

Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y manejo de fuego, region chaqueña occidental (Argentina) II: follaje y residuos de árboles y arbustos

KUNST, C.¹; LEDESMA, R.¹; BRAVO, S.²; DEFOSSÉ, G.³; GODOY, J.¹; NAVARRETE, V.¹

RESUMEN

El fuego es fenómeno frecuente en la región chaqueña argentina. El contenido de agua (CH, %) es un factor que define la inflamabilidad de los combustibles vegetales, y sus cambios en magnitud pueden ser usados para comprender la ecología y régimen del fuego en una región, para planificar su uso como prescripto; o como un indicador de riesgo para su prevención. En este trabajo se evaluó la dinámica de CH a través del tiempo del follaje (combustible vivo), hojarasca y residuos leñosos de distinto diámetro (combustibles muertos) de 4 especies de árboles y 5 especies de arbustos nativos de la región. El CH fue determinado en forma gravimétrica cada 10-15 días entre mayo 2008 y octubre 2009. Los datos fueron analizados en forma gráfica y mediante análisis de la varianza empleando la estación climática, la especie y el tipo de combustible como factores de clasificación. La hojarasca presentó el menor CH promedio ($< 22\%$), con baja variabilidad y presentó correlación significativa con variables ambientales (precipitación caída entre fechas de muestreo y humedad del suelo a 0-30 cm y 30-60 cm). Los combustibles muertos presentaron una dinámica lineal declinante de CH, sugiriendo desecación casi constante. Sólo en algunos casos presentaron correlación significativa con variables ambientales. Los combustibles muertos con diámetro 0,5-2,5 cm presentaron el mayor CH promedio, pero las especies tuvieron una influencia significativa. En el follaje y ramitas (combustibles vivos) el CH promedio fue variable, y presentó una dinámica sinusoidal con amplitud estacional y dentro de estaciones. Los arbustos presentaron un mayor CH promedio que los árboles, y *Schinus* spp, un arbusto de hoja perenne, presentó el mayor CH promedio anual ($CH \approx 74\%$). En los árboles el CH promedio fue $\approx 45-50\%$, y menos variable que en los arbustos. Considerando los combustibles vivos, la estación más proclive al fuego sería el invierno y primavera temprana, mientras que en los residuos la época más proclive sería el segundo otoño e invierno luego de su corte. La hojarasca presentó una magnitud de CH por debajo del umbral de extinción teórico ($CH = 30\%$) y sería un factor importante en la propagación de fuego en la región.

Palabras clave: régimen de fuego, riesgo de fuego, región chaqueña.

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Jujuy 850, Santiago del Estero, G4200CQR, Argentina. Correos electrónicos: kunst.carlos@inta.gob.ar, ledesma.roxana@inta.gob.ar

²Universidad Nacional de Santiago del Estero, Cátedra de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales, Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina.

³Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico, (CIEFAP) y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Sede Esquel, Esquel, Chubut. Correo electrónico: gdefosse@ciefap.org.ar

ABSTRACT

Fire is a common disturbance in the Chaco region of Argentina. The fuel moisture content (CH, %) is a factor defining inflammability and its changes throughout time. CH could be used to understand the fire regime and ecology, planning the use of prescribed fire and as an index of fire risk. In this research we assessed the dynamics of CH of the foliage (live fuels), litter and coarse woody debris (CWD) of different diameter (dead fuels) of 4 tree and 5 shrub native species. CH was monitored using the gravimetric method every 10-15 days from May 2008 to October 2009. Data were analyzed graphically and with analysis of variance using season, species and fuel type as classification factors. Litter showed a low mean CH (< 22%) with low variability but with a significant correlation with environmental variables (rainfall registered between sampling dates and soil moisture content at two depths 0-30 cm and 30-60 cm). Dead fuels presented a declining, almost lineal dynamics throughout time, suggesting a constant desiccation. Only in some cases showed significant correlation with environmental variables. Dead fuels of diameter 0.5-2.5 cm presented a high CH mean, and species were a significant factor. In live fuels, the average CH was variable and its dynamics followed a sinusoidal pattern with seasonal and intraseason amplitude. Shrubs presented usually a high CH mean and *Schinus* spp., a species with perennial leaves, showed the highest annual mean (CH \approx 74%). In tree species, the mean CH was 45-50 %, with less variability than shrub species. Considering live fuels, the fire prone season would be from winter to early spring, while in woody residues would be the second winter after their cut. Litter showed an annual mean CH under the threshold of extinction (CH = 30%) and may be a key factor in fire propagation in the region.

Keywords: fire regime, fire risk, Chaco region.

INTRODUCCIÓN

El fuego es la manifestación del proceso de combustión del material hidrocarbonado que forma el tejido vegetal, y es un fenómeno frecuente en la región chaqueña argentina (Bravo *et al.*, 2001, Bianchi *et al.*, 2013). El agua impide o retarda la combustión debido a su alto calor específico, lo que hace necesario una elevada cantidad de energía para desplazarla (ebullición), desecar el combustible y llegar a la temperatura de ignición (Alexander, 1982). La humedad o contenido de agua (CH) de los combustibles vegetales es un índice de su facilidad de encendido; y se emplea universalmente para caracterizar la posible intensidad y severidad del fuego (Fernandes *et al.*, 2012). El CH varía de acuerdo al clima, a la fenología y a la fisiología de las especies, el tamaño de los combustibles, y otras características como su grado de exposición al sol (Ruiz Gonzalez, 2004; Wittich, 2011).

El fuego es un fenómeno frecuente en la región chaqueña, un bioma ubicado en el norte de Argentina y países limítrofes (Morello y Saravia Toledo, 1959). Su vegetación es un mosaico de bosques, arbustales y sabanas (Bucher, 1982). Las especies leñosas más comunes pertenecen a los géneros *Schinopsis*, *Aspidosperma*, *Prosopis*, *Acacia* y *Celtis*, entre otras. El bosque se presenta en posición topográfica 'alto' o 'loma', los parques en la media loma y las sabanas en los bajos (Kunst *et al.*, 2006b). Estos 'modelos' de combustible (*sensu*; Rothermel, 1983) se diferencian por: (a) tipo de combustible que propaga el fuego (pastizal en el bajo y en la media loma, y leñosas en el alto); (b) diferente acumulación de combustible fino por unidad de superficie: el alto presenta de manera natural un

cambio en la composición botánica y una disminución en la densidad de gramíneas con respecto a la media loma (Kunst *et al.*, 2006b); y (c) características de la fisonomía de vegetación que modifican la velocidad del viento y la dinámica de la humedad relativa del aire (i.e. altura y densidad de árboles). La cobertura de árboles con altura superior a 6-7 m es también distinta: en la media loma la misma es media a baja, en el alto es alta a muy alta. La cobertura arbórea limita la radiación solar, un factor clave en el desecamiento de los combustibles ubicados en estratos más bajos (Rothermel *et al.*, 1986). El 'parque' consiste en isletas de árboles y arbustos rodeadas de especies de gramíneas nativas. El fuego usualmente comienza en las sabanas y pastizales debido a la disponibilidad de combustible fino en cantidad, y en condiciones climáticas extremas (baja humedad relativa del aire y vientos de alta velocidad) puede propagarse a través de 'escaleras de combustible' a los arbustales y bosques y desarrollar fuego de copa (Tortorelli, 1947; Bravo *et al.*, 2001).

Existe la noción empírica de que en la región chaqueña argentina la estación seca (invierno-primavera) es la más propensa al fuego debido a la desecación de los combustibles. Esta es una tendencia general, pero que necesita ser corroborada de manera objetiva debido a que el complejo de combustibles está compuesto por diversas especies y formas de vida que presentan distintas características (fenología, adaptación a la sequía, proporción de tejido vivo/muerto, etc.), y es necesario evaluar la dinámica específica y las posibles diferencias en el CH (Matt Davies y Legg, 2011; Pellizzaro *et al.*, 2006). Es también útil establecer la fortaleza de la asociación entre el CH y las variables climáticas a fin de evaluar las mismas como método sustituto in-

directo para predecir el peligro de fuego mediante modelos matemáticos (Castro *et al.*, 2003; Ruiz Gonzalez, 2004).

La dinámica temporal del CH en órganos vivos de *Acacia aroma* (tusca) y de residuos leñosos generados por la práctica del rolado ha sido informada por Kunst *et al.* (2001, 2006a). Los objetivos de este trabajo fueron: (a) cuantificar la dinámica estacional del CH en órganos de diferentes especies leñosas nativas de la región chaqueña, ampliando la información existente; (b) analizar los efectos de la estación climática y las características del combustible tales como especie, grupo funcional, tamaño, etc., sobre el CH, y (c) analizar la correlación estadística entre el CH, la humedad del suelo y las variables climáticas. Esta información se interpretó desde los puntos de vista de la ecología, la prevención y el manejo del fuego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se realizó en el Campo Experimental 'La María', Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Santiago del Estero, Argentina (28° 3' S y 64° 15' W). El clima es semiárido-subtropical, con inviernos fríos y secos, y veranos calientes y lluviosos (Boletta, 1988). La precipitación media anual es 574 mm, concentrados desde noviembre a mayo (INTA EEA Santiago del Estero, serie 1936-2005). El trabajo

de campo se realizó entre mayo 2008 y octubre 2009. Los datos diarios de temperatura (T, °C), humedad relativa del aire (HR, %) máxima y mínima, velocidad del viento a 2 m de altura (VV, km.h⁻¹), precipitación (mm) y radiación solar recibida (Rad, MJ.m⁻²) correspondientes al período de observación fueron provistos por el Observatorio Meteorológico, distante a 6 km del área de muestreo.

Se consideró "combustible" todo aquel material orgánico susceptible de encenderse (Schroeder y Buck, 1970). El comportamiento del fuego varía de acuerdo al CH, y a factores topográficos, atmosféricos y otros propios del combustible (Ruiz Gonzalez, 2004). Para 'bloquear' la variabilidad generada por los dos primeros factores, se seleccionaron para el estudio dos tipos de vegetación ubicados los sitios ecológicos: media loma (parques) y alto (bosques). En el caso del bosque, el área seleccionada corresponde a un 'rolado', tratamiento mecánico que aplasta la biomasa de arbustos con siembra de *Panicum maximum* cv Gatton Jacq., creando una fisonomía de 'bosque con herbáceas' (Kunst *et al.*, 2006a). En base a la bibliografía (Tortorelli, 1947; Bravo *et al.*, 2001; Kunst *et al.*, 2006b) y la experiencia de los autores (observación empírica de especies que se encienden en fuegos accidentales y prescritos) se seleccionaron en cada sitio/modelo cinco especies de arbustos, cuatro de árboles nativos y hojarasca (tabla 1).

| Sitio ecológico | Tamaño y diámetro | Grupo funcional | Especies ¹ | Categoría |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Media Loma | Fino (Ø ≤ 0,5 cm) (follaje y ramitas) | Arbustos | <i>Schinus</i> spp (perenne) (sch spp.), molle | Viva o en proceso de curado |
| | | | <i>Celtis ehrenbergiana</i> (Klotzsch.) Liebm (decidua) (cel ehe) | |
| | | | <i>Aloysia gratissima</i> (Gillies et Hook. ex. Hook) Tronc.(decidua) (alograt) | |
| | | | <i>Acacia furcatispina</i> (Burkart) (decidua) (acafur) garabato | |
| | | | <i>Lippia turbinata</i> (Griseb. decidua) (lip tur), poleo | |
| | | Árboles | <i>Schinopsis lorentzii</i> (Griseb.) Engler (decidua tardía) (sch lor) | |
| | | | <i>Aspidosperma quebracho blanco</i> Schldt. (perenne) (asp que) | |
| | | | <i>Prosopis nigra</i> (Griseb.) Hyeron. (decidua) (pro nig) | |
| | | | <i>Zyziphus mistol</i> Griseb.(decidua tardía) (ziz mis) | |
| | | Hojarasca (Mantillo) | Especies varias | Muerto |
| Alto | Fino (Ø =0,5-2,5 cm, 1) Medio (Ø =2,5-10 cm, 2) Grueso (Ø => 10 cm, 3) | Árboles | <i>Schinopsis lorentzii</i> (sch lor) | Muerto (leña) |
| | | | <i>Aspidosperma quebracho blanco</i> (asp que) | |
| | | | <i>Prosopis nigra</i> (pro nig) | |
| | | | <i>Zyziphus mistol</i> (ziz mis) | |
| | | Arbustos | <i>Acacia furcatispina</i> (aca fur) | |

Tabla 1. Características de los combustibles muestreados para estimación de contenido de humedad. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero. Ø = diámetro. Decidua/perenne se refiere al follaje.

¹Nomenclatura de acuerdo a Flora del Cono Sur, Catálogo de plantas vasculares, Instituto Darwinion, Verificado: 29 de agosto de 2013, en <http://www2.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina/FA.asp>

| Estación climática | Fechas | | CH promedio ¹ | Comparación de medias ² | | | |
|--------------------|------------|------------|--------------------------|------------------------------------|---------|---------|--------|
| | Inicio | Fin | (%) | O1 | Ver 1 | O2 | Prim 1 |
| O 1 | 13/05/2008 | 12/06/2008 | 90,46 | | | | |
| Ver 1 | 06/01/2009 | 17/03/2009 | 60,45 | s/d | | | |
| O 2 | 31/03/2009 | 24/06/2009 | 53,34 | s/d | 0,0549 | | |
| Prim 1 | 25/09/2008 | 22/12/2008 | 40,56 | 0,0171 | <0,0001 | s/d | |
| Invierno 2 | 06/07/2009 | 17/09/2009 | 36,39 | 0,0127 | <0,0001 | <0,0001 | 0,022 |
| Prim 2 | 05/10/2009 | 10/11/2009 | 35,77 | 0,0115 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0171 |
| Invierno 1 | 03/07/2008 | 02/09/2008 | 29,3 | <0,0001 | 0,0003 | 0,0623 | 0,0346 |

Tabla 2. Contenido de humedad promedio (CH, %) del follaje y hojarasca clasificados por estación climática, 2008-09. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero. Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera. s/d = sin diferencia significativa entre medias, $\alpha = 0,05$. Las estaciones climáticas no presentadas no poseen diferencias significativas entre ellas.

¹LS MEANS, ²Comparación basada en datos transformados a rangos, test de t, $\alpha = 0,05$.

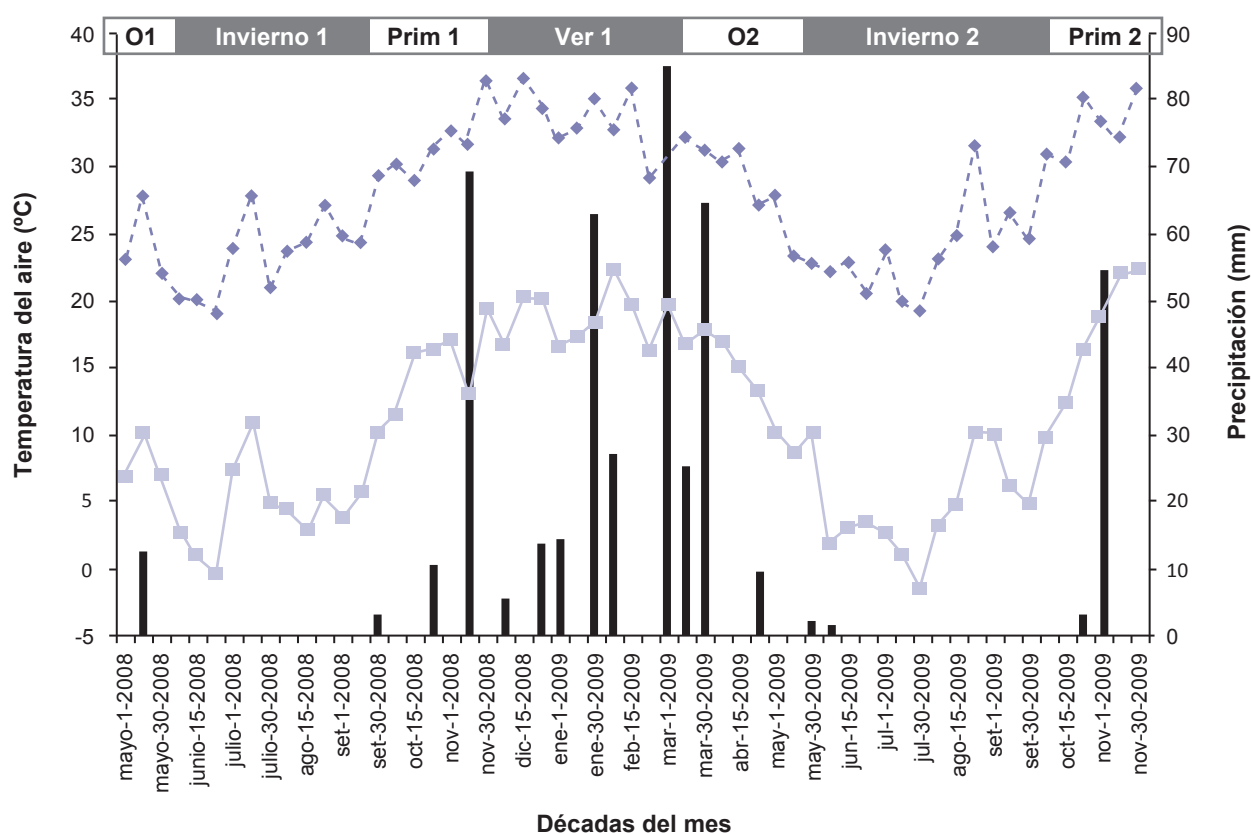


Figura 1. Dinámica temporal de la precipitación (mm, barras) y de las temperaturas máxima (rombos) y mínima (cuadrados) del aire (°C, promedio decádico). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

Los combustibles se clasificaron en dos tipos:

a. combustibles vivos, unidos a la planta al momento del muestreo, compuestos por follaje y ramitas; cosechados a mano con tijera y consistentes en una mezcla natural

de hojas/tallos vivos y secos según la época, de diámetro < 0,5 cm, extraídos de 3 individuos por especie, seleccionados al azar. En todos los casos los individuos eran plantas desarrolladas. Las muestras fueron introducidas

en una bolsa de *nylon* inmediatamente luego del corte, identificadas y pesadas con una balanza electrónica de precisión 0,1 gr, almacenadas en un recipiente con aislación térmica y llevadas al laboratorio donde fueron secadas por 48 hs a 60° C y pesadas nuevamente. La presencia de tejido seco/muerto de una misma especie en una misma muestra es más representativa del CH de la carga de combustible que el muestreo de los órganos/tejidos vivos o muertos por separado (Agee *et al.*, 2002).

b. combustibles muertos finos y gruesos, sin contacto con la planta, compuestos por hojarasca y residuos leñosos. La hojarasca se recolectó a mano, en tres lugares al azar. Para los residuos leñosos, se cortaron con tijera y/o motosierra los troncos de las especies seleccionadas, $n = 3$ por especie, simulando residuos de rolado, que fueron clasificados de acuerdo a su diámetro y tiempo de retardo (tabla 1; Bianchi *et al.*, 2013) y se depositaron en el suelo. En cada fecha de muestreo las muestras fueron pesadas con una balanza electrónica, precisión 0,01 gr. Al final del período de muestreo, se trasladaron todas las muestras a laboratorio, se secaron por 48 hs a 60° C y se pesaron nuevamente.

Para evaluar contenido de agua del suelo (HS), en cada lugar de muestreo se tomaron 3 muestras al azar a dos profundidades: 0-30 cm y 30-60 cm.

Los muestreos de suelo y combustibles tuvieron frecuencia semanal durante el período primavera-verano, y quincenal durante el invierno. Las muestras se recolectaron entre las 10 y 12 h AM. Este enfoque se basa en el hecho que la variación diurna de CH es insignificante en términos del comportamiento de fuego y la más importante es la variación estacional (Alexander, 1988).

El CH se estimó mediante gravimetría (Bianchi *et al.*, 2013). En el caso de los combustibles muertos, el peso seco corresponde al peso registrado al final de la estación de muestreo, es decir, que los cambios en el CH tuvieron en cuenta la pérdida de masa causada por la degradación de la madera durante el período de muestreo causado por ataque de microorganismos.

Se calculó el promedio de la HS y del CH por fecha de muestreo. La HS promedio fue sometida a un análisis de la varianza con enfoque de medidas repetidas, empleando sitio ecológico y profundidad de muestreo como variables independientes. También se construyeron gráficos de HS versus tiempo para evaluar la dinámica temporal de esta variable. Para el CH se identificaron las siguientes fuentes de variación:

- **Estación climática:** representa el efecto de las diferencias inter e intraestacionales de la ocurrencia de lluvias y la dinámica de la temperatura del aire. El período de muestreo (13/5/2008 a 10/11/2009) fue dividido de acuerdo a la precipitación y temperatura del aire observadas en 7 'estaciones climáticas' (tabla 2 y fig. 1). Las fechas de comienzo y fin de cada una fueron definidas de acuerdo a dos umbrales: (a) precipitación caída en la semana previa al muestreo, y (b) promedio decádico de temperatura del aire, ambos registrados en el Obser-

vatorio Meteorológico, INTA EEA Santiago del Estero. Para establecer la fecha de comienzo de la 'primavera' se utilizó una precipitación ≥ 10 mm (observación empírica) y promedio decádico de temperatura mínima del aire $> 10^\circ$ C, pero en ascenso. La fecha de comienzo del 'verano' se definió a partir del promedio decádico de la temperatura del aire mínima $> 15^\circ$ C y con lluvias cada 10-15 días. El otoño fue definido como el período donde el promedio decádico de temperatura mínima del aire $> 15^\circ$ C y en descenso. El invierno es una temporada sin lluvias y con promedio decádico de temperatura mínima del aire $\leq 10^\circ$ C (fig. 1). Las estaciones climáticas similares poseen el mismo patrón de comportamiento de lluvia y temperatura del aire, pero al variar las magnitudes de lluvia y temperatura la duración de las mismas es diferente.

- **Especie:** representa características intrínsecas ligadas a la adaptación a la sequía, los sistemas radicales, el espesor de la hojas, la anatomía y la morfología, el contenido de lignina y la composición química, factores intrínsecos de cada especie, y que pueden afectar el CH, la ignición y el comportamiento de fuego (Chuvieco *et al.*, 2009; Matt Davies y Legg, 2011).
- **Grupo funcional:** los datos de combustibles finos vivos y muertos (follaje y hojarasca) se clasificaron en árboles, arbustos y hojarasca. La significancia de este factor permitiría generalizar y trabajar a un nivel de percepción más globalizador que especie.
- **Tamaño de combustible:** Representa el efecto del diámetro sobre la dinámica del CH. Debido a aspectos físicos, los combustibles de menor diámetro poseen mayor superficie de absorción y de evaporación que los combustibles de mayor diámetro. Este factor solo se incluyó en el análisis de los combustibles muertos.
- **Tiempo cronológico:** representa la variación producida por el tiempo cronológico por sí mismo (días de muestreo = 1, 2, ..., n).

Se graficó el CH promedio a través del tiempo por especie y tamaño del combustible para evaluar visualmente su dinámica. Se analizó la dispersión de CH mediante gráficos de caja (Ramsey y Schafer, 2002) empleando el paquete PAST (Hammer, 2013).

Se realizó un ANVA empleando el CH como variable dependiente, y las fuentes de variación, previamente listadas, como factores de clasificación. Se emplearon modelos estadísticos matemáticos clásicos y medidas repetidas con sentido biológico y de interés para el trabajo (Zar, 1999). 'Tiempo cronológico' se incluyó como covariable y las medias de CH están ajustadas a la misma.

La variable CH fue convertida a rangos para cumplir con los supuestos del análisis de la varianza (Conover, 1980). Para los cálculos matemáticos se emplearon los PROC MIXED y PROC GLM del paquete estadístico SAS (2002). La separación de medias se efectuó mediante el test de Duncan y la opción LSMEANS: si ambos métodos coincidían se informó solamente el resultado del test de

Duncan. La correlación entre el CH promedio de los combustibles con la HS, la precipitación caída, y el promedio de HR, VV y Rad observadas entre fechas de muestreo se analizó mediante el coeficiente de Kendall (Conover, 1980), empleándose el PROC CORR del paquete estadístico SAS (2002).

Se empleó un umbral de extinción teórico de CH $\geq 30\%$ para interpretar los resultados en un contexto de ecología y manejo de fuego (Bianchi *et al.*, 2013). Un CH $< 30\%$ implica que el combustible está muerto para fines de modelización de comportamiento de fuego, es decir que las

condiciones atmosféricas son las que controlan la dinámica de CH, no la humedad de las células vivas (Sun *et al.*, 2006; Sullivan, 2010).

RESULTADOS

Se registró un total de 471 mm para la temporada de lluvias 2008-2009. Entre el 13/5/2008 y el 31/12/2008 la precipitación total fue 119,5 mm y entre 1/1/2009 y el 10/11/2009 fue 351,4 mm. Las variables climáticas siguieron un patrón sinusoidal (figs. 1 y 2). Las menores mag-

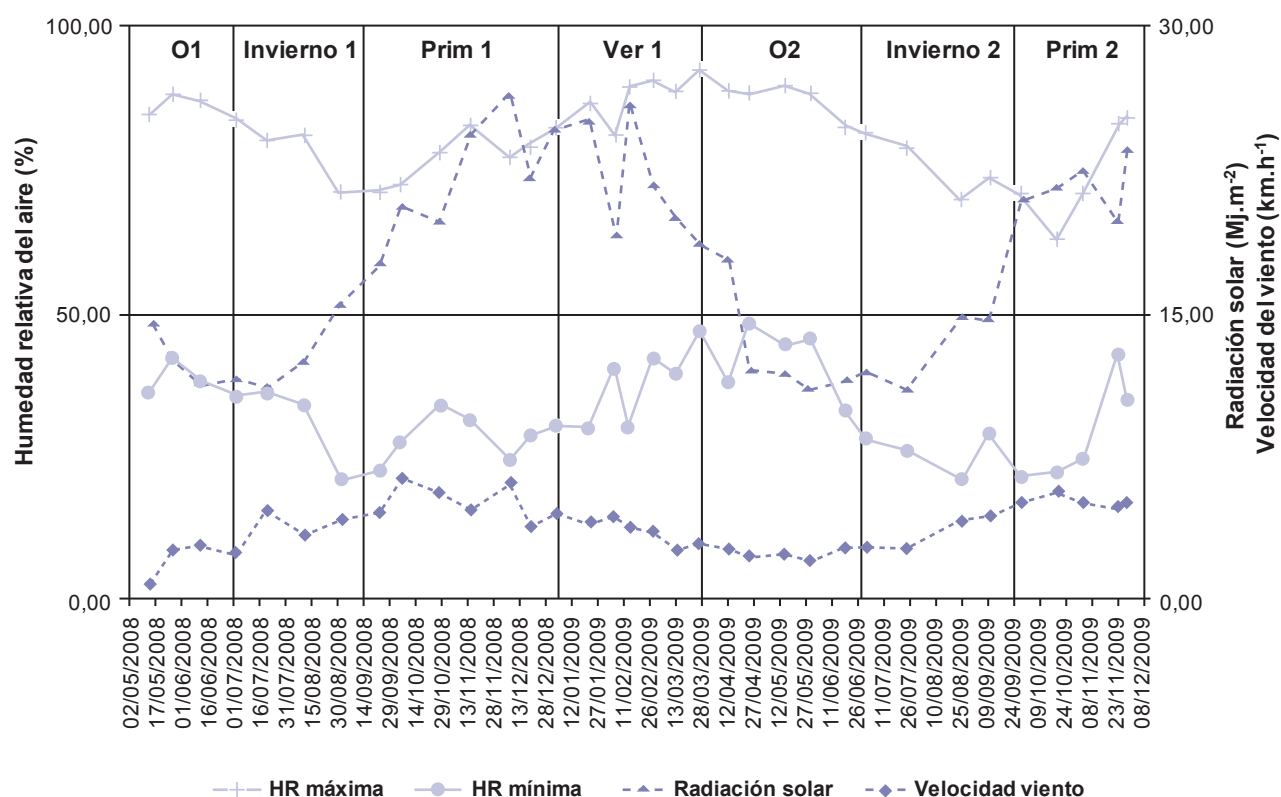


Figura 2. Dinámica temporal de los promedios de la humedad relativa del aire máxima (cruces) y mínima (círculos), radiación solar (triángulos) y velocidad del viento a 2 m de altura (rombos) entre fechas de muestreo. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

| Grupo funcional | CH promedio ¹ | | Comparación de medias ⁴ | |
|-----------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------|
| | Transform ² | Sin transform ³ | Árboles | Arbustos |
| Árboles | 521,7 | 49,76 | | |
| Arbustos | 463,40 | 54,10 | 0,0002 | |
| Hojarasca | 144,5 | 21,25 | 0,0001 | 0,0001 |

Tabla 3. Contenido de humedad (CH, %) promedio del follaje y hojarasca clasificados por grupo funcional, 2008-2009. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero.

¹Promedios calculados por LSMEANS (SAS 2002).

²Promedio de datos transformados a rangos.

³Promedio de datos sin transformar.

⁴Diferencias entre medias de datos transformados estimadas por LSMEANS, prueba de t.

| Especies | Caract. | CH Promedio ¹ | | CV ⁴ | Comparación de medias ⁵ | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | Transf. ² | Sin transf. ³ | | Sch spp | Sch lor | Ziz mis | Asp que | Cel ehe | Pro nig | Lip tur | Alo gra | Aca fur |
| <i>Schinus spp</i> | Ar, per | 601 | 73,82 | 127,41 | | | | | | | | | |
| <i>Schinopsis lorentzii</i> | AR, dec | 565,63 | 52,67 | 50,52 | s/d | | | | | | | | |
| <i>Zizyphus. mistol</i> | AR, dec | 518,65 | 45,24 | 58,09 | 0,0097 | s/d | | | | | | | |
| <i>A. quebracho blanco</i> | AR, per | 513,74 | 45,64 | 43,79 | 0,0062 | s/d | s/d | | | | | | |
| <i>C. ehrenbergiana</i> | Ar, dec | 485 | 63,72 | 133,11 | 0,0003 | 0,0127 | s/d | s/d | | | | | |
| <i>P. nigra</i> | AR, dec | 479 | 46,17 | 85,70 | 0,0001 | 0,0073 | s/d | s/d | s/d | | | | |
| <i>L. turbinata</i> | Ar, dec | 466 | 73,27 | 188,37 | <0,0001 | <0,0001 | s/d | s/d | s/d | s/d | | | |
| <i>A. gratissima</i> | Ar, dec | 435 | 42,12 | 59,77 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0103 | 0,0158 | s/d | s/d | s/d | | |
| <i>A. furcatispina</i> | Ar, dec | 362 | 34,46 | 51,48 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0014 | s/d | |
| Hojarasca | --- | 141,48 | 17,57 | 99,18 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |

Tabla 4. Contenido de humedad (CH, %) del follaje, clasificados por especie, y la hojarasca. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: Ar: arbusto, AR: árbol, per: follaje perenne, dec: follaje decíduo; s/d = sin diferencia significativa entre medias, $\alpha = 0,05$.

¹Promedios calculados por LSMEANS (SAS 2002)

²Promedio de datos transformados a rangos.

³Promedio de datos sin transformar.

⁴Coefficiente de variación, datos sin transformar/Variation coefficient, untransformed data.

⁵Diferencias entre medias de datos transformados estimadas por LSMEANS, prueba de t.

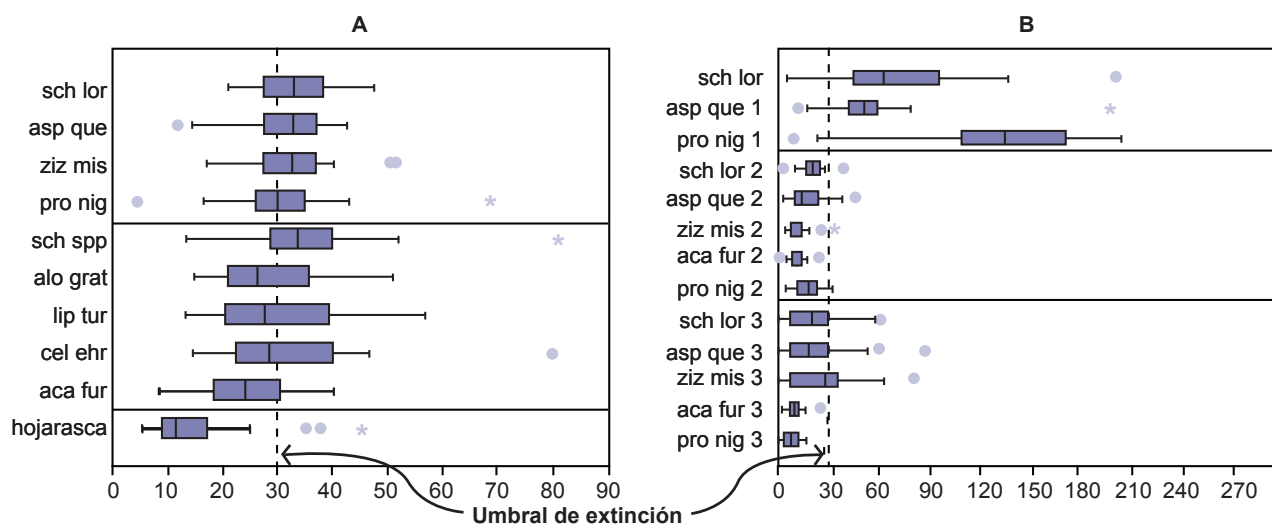


Figura 3. Gráficos de caja del contenido de agua (%) de: (A) follaje y hojarasca y (B) residuos leñosos. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09. Abreviaturas: *Schinopsis lorentzii*: sch lor; *Aspidosperma quebracho-blanco*: asp que; *Zizyphus mistol*: ziz mis; *Prosopis nigra*: pro nig; *Schinus spp*: sch spp; *Aloyssia gratissima*: alo grat; *Lippia turbinata*: lip tur; *Celtis ehrenbergiana*: cel ehe; *Acacia furcatispina*: aca fur. 1: diámetro 0,5-2,5 cm; 2: diámetro 2,5-10 cm; 3: diámetro > 10 cm

nitudes de T y HR se observaron entre mediados y fines de invierno, la menor radiación solar se registró a fines de otoño-comienzos de invierno, y la VV aumentó hacia fines de invierno alcanzando el pico durante la primavera (fig. 2). No se observó diferencia significativa en la HS promedio entre sitios ecológicos y profundidades de suelo. En am-

bas profundidades de suelo, la dinámica de la HS emuló la dinámica estacional de la precipitación.

Follaje, ramitas y hojarasca. Los factores "estación climática" y "especie", y la interacción estación climática*especie fueron altamente significativos ($P > F < 0,0001$ en todos los casos). El mayor CH promedio se

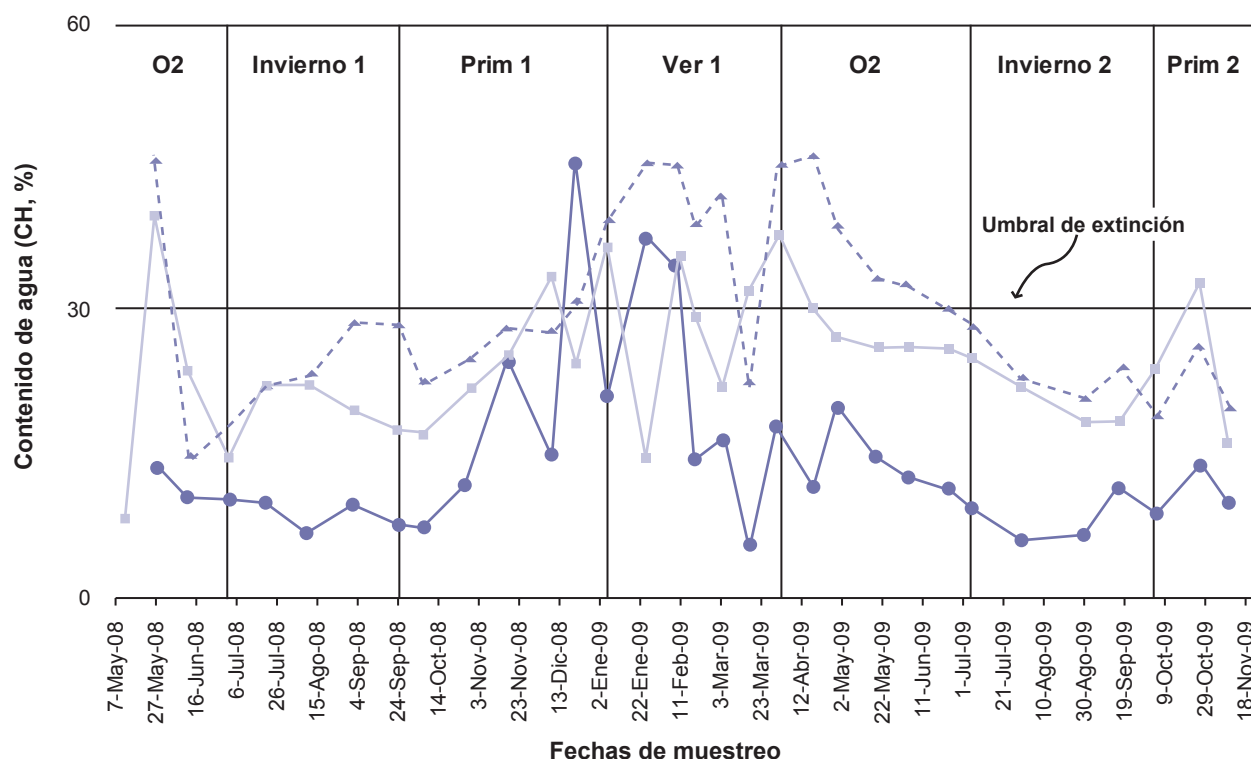


Figura 4. Dinámica estacional de CH (%) de la hojarasca (círculos) y del follaje de *Celtis ehrenbergiana* (triángulos) y *Acacia furcatispina* spp. (cuadrados). Campo Experimental 'La Maria', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09. .

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

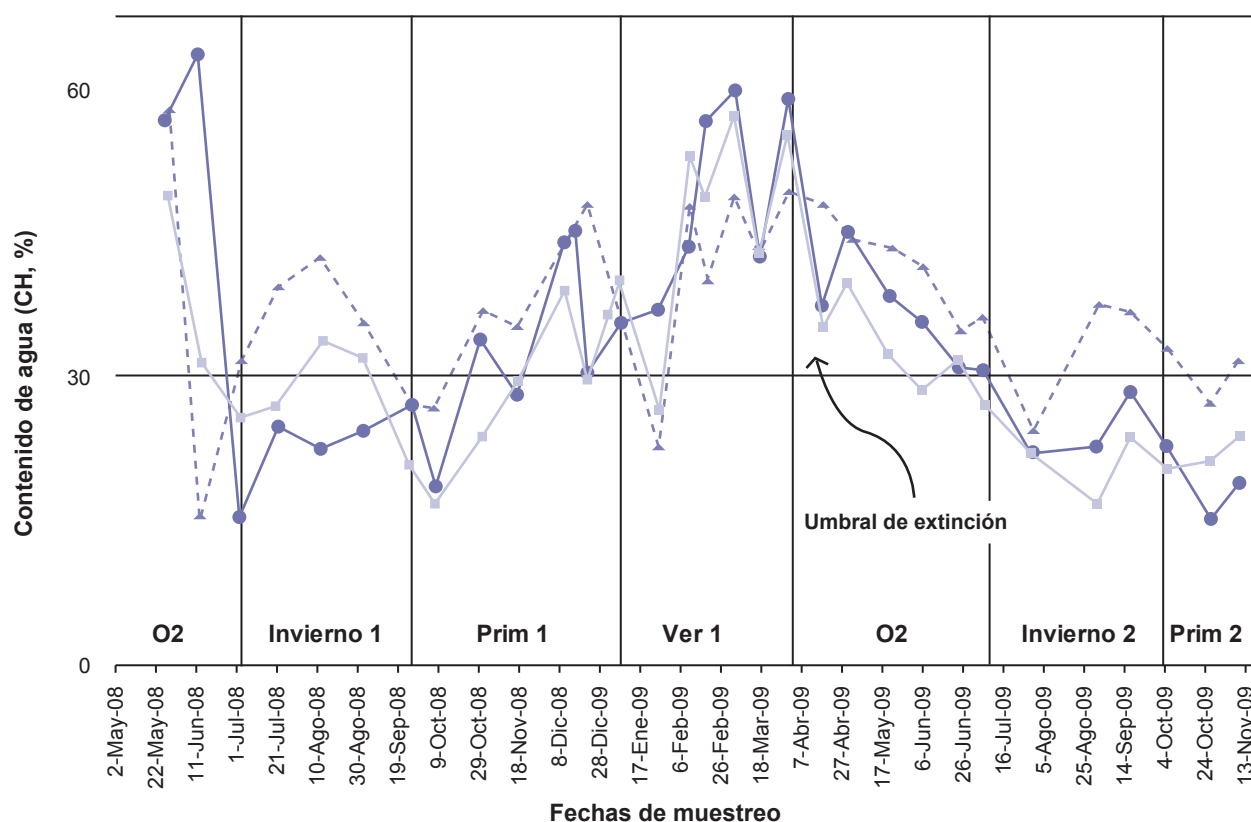


Figura 5. Dinámica estacional de CH (%) del follaje de *Lippia turbinata* (círculos), *Aloysia gratissima* (cuadrados) y *Schinus* spp (triángulos). Campo Experimental 'La Maria', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

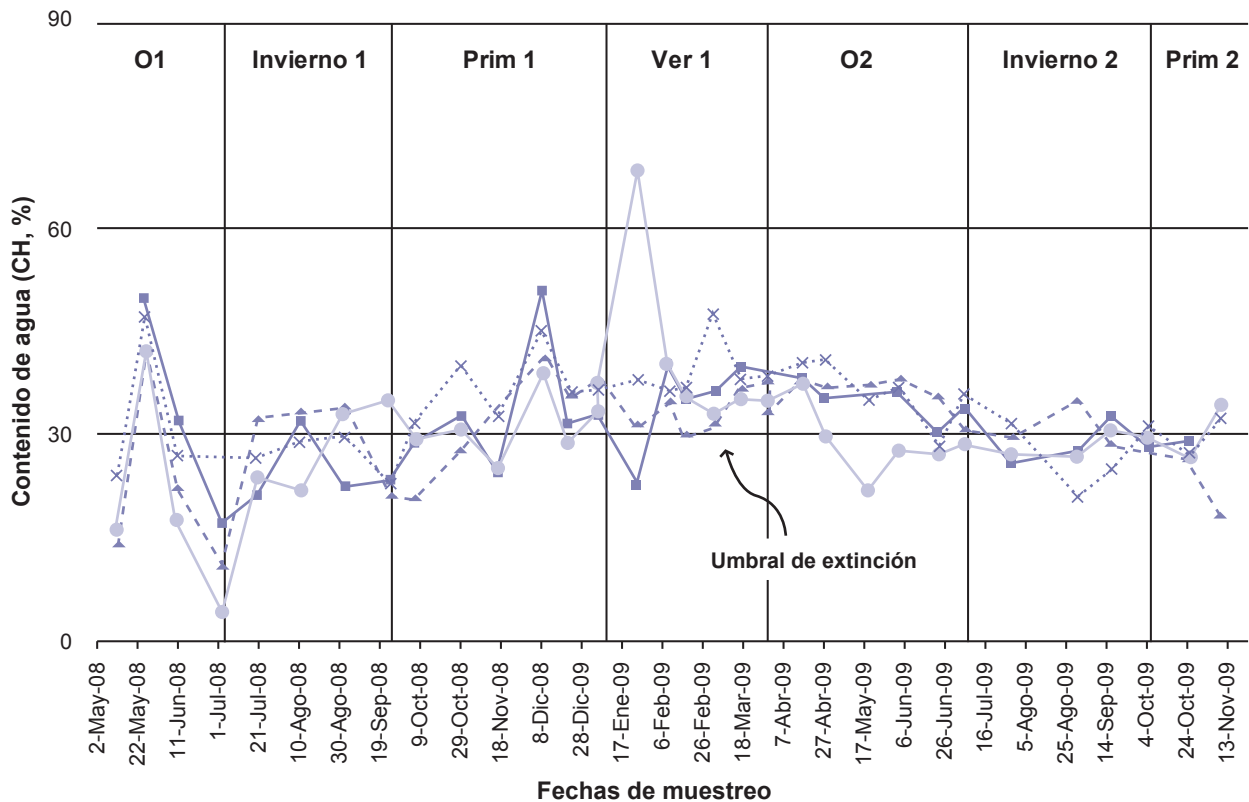


Figura 6. Dinámica estacional de CH (%) del follaje de *Prosopis nigra* (círculos), *Ziziphus mistol* (cuadrados), *Aspidosperma quebracho-blanco* (triángulos) y *Schinopsis lorentzii* (cruces). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.
Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

| Grupo | Especies | Humedad del suelo (%) a profundidad | | | | Precipitación (mm) ¹ | | Humedad relativa del aire (%) ² | | | | Velocidad del viento (km·h ⁻¹) ³ | |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------------|------|-------------|------|---------------------------------|------|--------------------------------------------|--------|-------------|------|---------------------------------------------------------|------|
| | | 0-30 cm | | 30-60 cm | | τ | P | Máxima | | Mínima | | τ | P |
| | | τ | P | τ | P | | | τ | P | τ | P | | |
| Hojarasca | ---- | 0,31 | 0,01 | 0,41 | 0,00 | 0,45 | 0,00 | 0,21 | 0,10 | 0,18 | 0,15 | 0,08 | 0,54 |
| | <i>Aloysia gratissima</i> | 0,28 | 0,04 | 0,40 | 0,00 | 0,21 | 0,12 | 0,47 | 0,00 | 0,41 | 0,00 | -0,20 | 0,12 |
| | <i>Schinus</i> spp | 0,27 | 0,04 | 0,28 | 0,03 | 0,18 | 0,18 | 0,32 | 0,01 | 0,39 | 0,00 | -0,20 | 0,12 |
| Arbustos | <i>Lippia turbinata</i> | 0,34 | 0,01 | 0,39 | 0,00 | 0,27 | 0,04 | 0,58 | <,0001 | 0,47 | 0,00 | -0,31 | 0,01 |
| | <i>Celtis ehrenbergiana</i> | 0,32 | 0,01 | 0,39 | 0,00 | 0,20 | 0,12 | 0,42 | 0,00 | 0,29 | 0,02 | -0,23 | 0,07 |
| | <i>Acacia furcatispina</i> | 0,07 | 0,58 | 0,28 | 0,04 | 0,19 | 0,14 | 0,26 | 0,04 | 0,20 | 0,11 | -0,07 | 0,59 |
| Árboles | <i>Prosopis nigra</i> | 0,23 | 0,07 | 0,32 | 0,01 | 0,12 | 0,38 | -0,02 | 0,85 | -0,11 | 0,40 | 0,09 | 0,50 |
| | <i>Zizyphus mistol</i> | 0,00 | 0,99 | 0,08 | 0,56 | 0,20 | 0,13 | 0,37 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | -0,12 | 0,37 |
| | <i>A. quebracho blanco</i> | 0,19 | 0,13 | 0,25 | 0,05 | -0,05 | 0,70 | 0,18 | 0,15 | 0,20 | 0,12 | -0,26 | 0,04 |
| | <i>Schinopsis lorentzii</i> | 0,10 | 0,42 | 0,20 | 0,12 | 0,23 | 0,09 | 0,41 | 0,00 | 0,36 | 0,01 | -0,05 | 0,72 |

Tabla 5. Coeficiente de correlación de Kendall (τ) y su significancia entre contenido de humedad (CH, %) del follaje de distintas especies y la hojarasca con humedad a dos profundidades de suelo (HS), la precipitación, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento, 2008-2009. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero.

¹Precipitación caída entre fechas de muestreo.

^{2,3}Promedio entre fechas de muestreo.

presentó en las estaciones otoño 1 y verano 1 y el menor en invierno 1 y primavera 2, siendo la diferencia entre la estación más húmeda y la más seca de casi 3 veces (tabla 2). Se puede distinguir tres grupos de combustibles: los ár-

boles, los arbustos y la hojarasca, en base a la dispersión de los datos, a los promedios, a las diferencias entre los mismos y en relación al umbral de extinción. Los árboles presentaron un CH promedio mayor a los arbustos, y la

hojarasca presentó un CH promedio significativamente menor que los dos grupos funcionales anteriores (tabla 3). La mayor dispersión de los datos y el coeficiente de variación del CH se observó en los arbustos con follaje deciduo; seguidos por los árboles y la hojarasca (tablas 3 y 4, figs. 3 a 6). *Schinus spp.* presentó el mayor CH promedio y *A. furcatispina* el menor (tabla 4). *S. lorentzii*, *A. quebracho blanco* y *Z. mistol* presentaron entre sí diferencias significativas en el CH promedio de su follaje. *P. nigra* se diferenció significativamente de *S. lorentzii* (tabla 4).

En todas las especies la dinámica temporal del CH presentó una forma sinusoidal con variaciones a dos niveles de percepción: entre-estaciones, con diferencia entre la CH máxima y mínima con período anual; e intra-estacional, con períodos de oscilación entre 10-15 días (figs. 4 a 6). En los arbustos, la amplitud de oscilación entre estaciones fue mayor que en los árboles, especialmente en primavera-verano, y la declinación otoñal fue gradual en los dos grupos (figs. 4 a 6). La amplitud de oscilación en los árboles no sobrepasó el 60%, salvo en *P. nigra* (fig. 4). En la hojarasca, el rango de variación estacional de CH fue mínimo

durante el invierno 1 y el otoño 2, observándose sólo oscilaciones durante el verano 1, pero la correlación con la HS y la precipitación fue significativa (tabla 5). En arbustos las correlaciones entre el CH, la HS a 0-30 cm y 30-60 cm, la precipitación y la HR fueron significativas, pero la magnitud de los coeficientes fue baja a media, destacándose *Schinus spp.* y *Lippia turbinata* (tabla 5). En los árboles, la correlación entre el CH y los parámetros ambientales no fue significativa.

Residuos leñosos. Los factores estación climática, tamaño y especie; y las interacciones tamaño*especie fueron altamente significativos en todos los casos ($P > F = 0,0001$). El otoño 1 presentó el mayor y la primavera 2 el menor CH promedio (tabla 6). El tamaño 0,5-2,5 cm presentó el mayor CH promedio (tabla 7), superando el umbral de extinción, pero con una gran dispersión de datos. Los residuos con diámetro $> 2,5$ cm presentaron la menor variación en el CH promedio, que estuvo siempre por debajo de 30%. El combustible de diámetro $> 2,5$ cm de *S. lorentzii* y *A. quebracho blanco* presentó el mayor CH promedio y el de *A. furcatispina* el menor (tablas 8 y 9).

| Estación climática | Fechas inicio/fin | CH promedio transformado ^{1,2} | Sin transformar ^{1,3} | (⁴) |
|--------------------|-------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| O 1 | 13/05-12/06/2009 | 1177,5 | 39,8 | a |
| Invierno 1 | 3/07-2/09/2008 | 1093,4 | 36,42 | b |
| Prim 1 | 25/09-22/12/2008 | 975,9 | 33,75 | c |
| Ver 1 | 6/01-17/3/2009 | 963,57 | 29,88 | c |
| O 2 | 31/03-24/06/2009 | 750,69 | 21,63 | d |
| Invierno 2 | 6/07-17/09/2009 | 552 | 15,39 | e |
| Prim 2 | 5/10-10/11/2009 | 381,2 | 9,29 | f |

Tabla 6. Contenido de humedad promedio (CH, %) de residuos leñosos por estación climática. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero. 2008-09

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

¹Promedios calculados por LSMEANS (SAS 2002).

²Promedio de datos transformados a rangos.

³Promedio de datos sin transformar.

⁴Medias seguidas por letras similares no son significativamente diferentes, test de Duncan.

| Tamaño / Diámetro | CH promedio | | Comparación de medias ⁴ |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Transformado ^{1,2} | S/transformar ^{1,3} | |
| 0,5-2,5 cm | 1243,32 | 71,5 | a |
| 2,5-10 cm | 800,97 | 16,31 | b |
| >10 cm | 683,84 | 16,2 | b |

Tabla 7. Contenido de humedad promedio (CH, %) de residuos leñosos muertos clasificados por tamaño. Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero. 2008-09.

¹Promedios calculados por LSMEANS (SAS 2002)

²Promedio de datos transformados a rangos.

³Promedio de datos sin transformar.

⁴Medias seguidas por letras similares no son significativamente diferentes, test de Duncan.

| Especies | CH promedio | | Comparación de medias ⁴ |
|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| | Transformado ^{1,2} | S/transformar ¹ | |
| <i>Schinopsis lorentzii</i> | 967,26 | 32,7 | a |
| <i>Aspidosperma quebracho blanco</i> | 963,62 | 27,2 | a |
| <i>Prosopis nigra</i> | 861,82 | 34,42 | b |
| <i>Zizyphus mistol</i> | 746,02 | 18,48 | c |
| <i>Acacia furcatispina</i> | 568,63 | 10,52 | d |

Tabla 8. Contenido de humedad promedio (CH, %) en residuos leñosos clasificados por especies. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

¹Promedios calculados por LSMEANS (SAS 2002).

²Promedio de datos transformados a rangos.

³Promedio de datos sin transformar.

⁴Medias seguidas por letras similares no son significativamente diferentes, test de Duncan.

| Especies | Tamaño/Diámetro (cm) | CH | CV |
|--------------------------------------|----------------------|--------|--------|
| <i>Prosopis nigra</i> | 0,5-2,5 | 126,74 | 53,63 |
| | 2,5-10 | 17,14 | 60,82 |
| | >10 | 6,63 | 78,90 |
| <i>Acacia furcatispina</i> | 0,5-2,5 | 18,34 | 35,84 |
| | 2,5-10 | 11,18 | 55,04 |
| | >10 | 8,94 | 96,46 |
| <i>Zizyphus mistol</i> | 0,5-2,5 | 10,76 | 25,06 |
| | 2,5-10 | 12,36 | 64,48 |
| | >10 | 25,12 | 106,07 |
| <i>Aspidosperma quebracho blanco</i> | 0,5-2,5 | 52,50 | 100,44 |
| | 2,5-10 | 17,89 | 89,56 |
| | >10 | 20,28 | 94,38 |
| <i>Schinopsis lorentzii</i> | 0,5-2,5 | 69,45 | 105,56 |
| | 2,5-10 | 20,56 | 81,30 |
| | >10 | 19,82 | 91,94 |

Tabla 9. Contenido de humedad promedio (CH, %) en residuos leñosos clasificados por especies y tamaños. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero. 2008-09. CV = coeficiente de variación.

En todas las especies los residuos de menor diámetro presentaron la mayor variación en el CH promedio, superando en general el umbral de 30%, holgadamente en el caso de *P. nigra* (figs. 7 a 11). En general, la dinámica anual del CH fue casi rectilínea con tendencia declinante durante el invierno 1 y parte de la primavera 1. La disminución del CH promedio se interrumpió durante la fase tardía de la primavera 1 y todo el verano 1, adoptando el CH en ese período una forma sinusoidal con períodos de oscilación de 10-12 días y superando algunos picos al CH inicial, específicamente en residuos de diámetro 0,5-2,5 cm de *P. nigra* y *S. lorentzii* que llegaron hasta CH = 200% (figs. 7 y 11). Durante el invierno 2 y la primavera 2, la progresión del CH adquirió nuevamente la forma rectilínea, pero la disminución del CH fue pronunciada, con magnitudes de CH \approx 1% en algunas especies y tipos de combustible (figs. 7 a

11). Dentro de este modelo general, existieron variaciones de acuerdo al tamaño y a la especie considerada. Así, *Z. mistol* siguió el patrón rectilíneo general descripto casi sin variaciones entre estaciones (fig. 9), mientras que los residuos de diámetro 0,5-2,5 cm de *S. lorentzii* y *A. quebracho blanco* presentaron grandes oscilaciones de CH durante todo el ciclo, especialmente el verano 1 (figs. 10 y 11). Los residuos con diámetro > 2,5 presentaron un CH promedio casi constante, con amplitudes de oscilación bajas comparadas con los otros tipos de combustible (figs. 7 a 11).

El CH de los residuos de diámetro 0,5-2,5 cm y 2,5-10 cm presentaron correlación significativa con la HS a profundidad 0-30 cm y 30-60 cm en algunas especies (tabla 10), pero sólo el CH de los residuos de todo tamaño de *S. lorentzii* presentaron una correlación significativa con la HS

| Especies | Diámetro (cm) | | hu30 | hu60 | pp | hmax | hmin |
|-------------------------------------|---------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Prosopis nigra</i> | 0,5-2,5 | τ | 0,24 | 0,12 | 0,19 | 0,18 | 0,20 |
| | | $P < F$ | 0,07 | 0,36 | 0,15 | 0,15 | 0,13 |
| | 2,5-10 | τ | 0,37 | 0,28 | 0,28 | 0,24 | 0,30 |
| | | $P < F$ | 0,00 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,02 |
| | >10 | τ | 0,21 | 0,10 | 0,09 | 0,05 | 0,04 |
| | | $P < F$ | 0,11 | 0,45 | 0,52 | 0,72 | 0,77 |
| | 0,5-2,5 | τ | Sin datos | | | | |
| | | $P < F$ | | | | | |
| <i>Acacia furcatispina</i> | 2,5-10 | τ | 0,41 | 0,24 | 0,19 | 0,35 | 0,45 |
| | | $P < F$ | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,01 | 0,00 |
| | >10 | τ | 0,20 | 0,20 | 0,09 | 0,25 | 0,23 |
| | | $P < F$ | 0,12 | 0,12 | 0,52 | 0,06 | 0,08 |
| <i>Zizyphus mistol</i> | 0,5-2,5 | τ | 0,43 | 0,14 | -0,07 | 0,62 | 0,43 |
| | | $P < F$ | 0,18 | 0,65 | 0,85 | 0,05 | 0,18 |
| | 2,5-10 | τ | 0,24 | 0,20 | 0,16 | 0,30 | 0,41 |
| | | $P < F$ | 0,12 | 0,19 | 0,27 | 0,04 | 0,00 |
| | >10 | τ | 0,18 | 0,24 | 0,03 | 0,06 | 0,07 |
| | | $P < F$ | 0,17 | 0,07 | 0,84 | 0,62 | 0,57 |
| <i>Asidosperma quebracho-blanco</i> | 0,5-2,5 | τ | 0,44 | 0,15 | 0,29 | 0,36 | 0,33 |
| | | $P < F$ | 0,00 | 0,24 | 0,03 | 0,00 | 0,01 |
| | 2,5-10 | τ | 0,25 | 0,19 | 0,03 | 0,15 | 0,18 |
| | | $P < F$ | 0,06 | 0,14 | 0,82 | 0,24 | 0,16 |
| | >10 | τ | 0,20 | 0,27 | 0,09 | 0,11 | 0,13 |
| | | $P < F$ | 0,12 | 0,04 | 0,50 | 0,41 | 0,30 |
| <i>Schinopsis lorentzii</i> | 0,5-2,5 | τ | 0,26 | 0,14 | 0,25 | 0,25 | 0,30 |
| | | $P < F$ | 0,05 | 0,29 | 0,06 | 0,05 | 0,02 |
| | 2,5-10 | τ | 0,43 | 0,26 | 0,18 | 0,27 | 0,27 |
| | | $P < F$ | 0,00 | 0,05 | 0,18 | 0,03 | 0,03 |
| | >10 | τ | 0,24 | 0,27 | 0,02 | 0,10 | 0,13 |
| | | $P < F$ | 0,06 | 0,04 | 0,85 | 0,45 | 0,32 |

Tabla 10. Coeficiente de correlación de Kendall (τ) entre el contenido de humedad promedio (CH, %) de residuos leñosos de distintas especies con: humedad de suelo a dos profundidades (%), precipitación (pp, mm), máxima y mínima humedad relativa del aire (hmax y hmin, %, respectivamente). Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09. Referencias: h30, profundidad 0-30 cm; h60, profundidad 30-60 cm.

de 0-30 cm y la precipitación. En general, la magnitud del coeficiente de correlación fue mediana a baja (tabla 10).

DISCUSIÓN

Datos del CH promedio de los combustibles de especies nativas y su variación estacional existen sólo para América del Norte y Europa. En coníferas se informan rangos de CH entre 120-360% para follaje 'nuevo' y 70-150% para follaje 'viejo' (Agee *et al.*, 2002; Keyes 2006). Para arbustos vivos de los géneros *Cistus*, *Erica* y *Rosmarinus*, los rangos de CH varían entre el 40 y el 180% para verano y otoño, respectivamente (Viegas *et al.*, 2001; Chuvieco *et al.*, 2009). En este trabajo, el follaje de especies leñosas presentó un promedio de CH generalmente inferior a las magnitudes

citadas, cercano al umbral de extinción teórico y superando el 60% el CH de *P. nigra* y *Schinus spp* en verano. Estas diferencias se atribuyen a: (a) distinta composición química intrínseca de los órganos vegetales de las especies estudiadas en comparación con las coníferas y arbustos citados, (b) la composición de las muestras que involucraron una mezcla de hojas, pecíolos y ramitas de diámetro < 0,5 cm, (c) diferencias climáticas entre hemisferios, y (d) la precipitación caída durante el período de estudio (2008-2009) que fue \approx 18% menor que el promedio histórico.

En el follaje y ramitas (combustibles vivos), el CH depende de las características intrínsecas de las especies tales como actividad fisiológica/fenológica, adaptación a la falta de agua, profundidad de raíces, entre otros (Sun *et al.*, 2006; Andrews *et al.*, 2006). La baja amplitud de oscilación

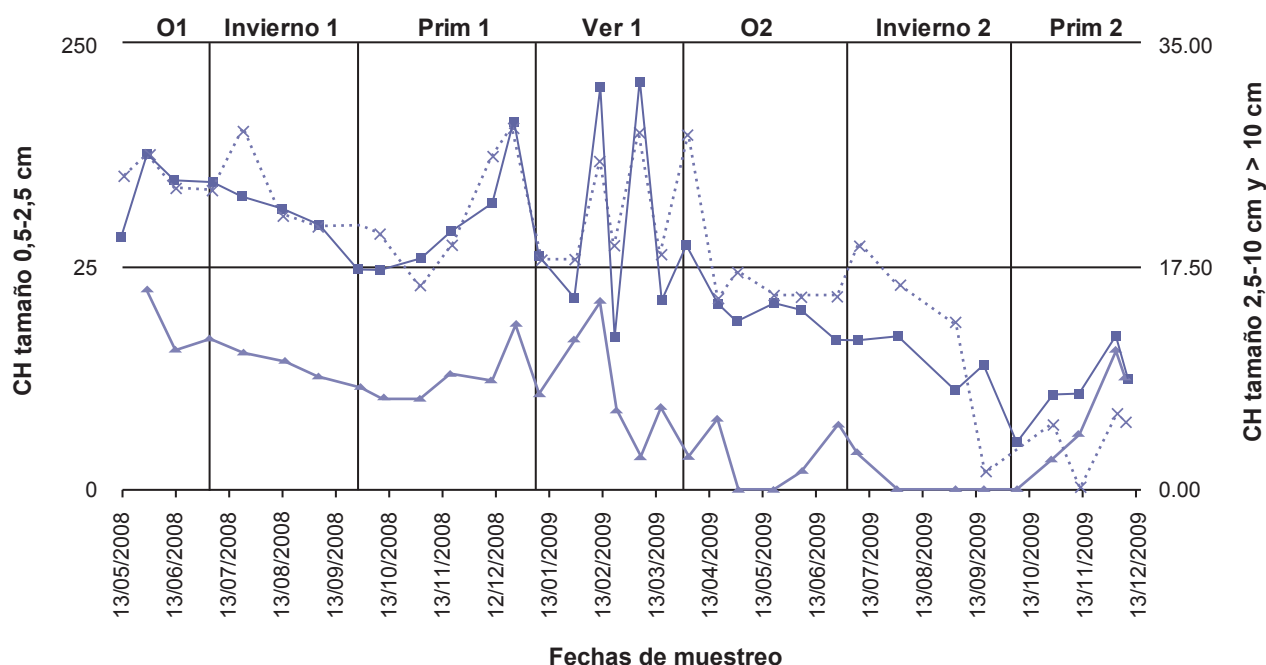


Figura 7. Dinámica estacional del CH (%) en residuos leñosos de *Prosopis nigra* clasificados por categorías de diámetro: 0,5-2,5 cm (cruces), 2,5-10 cm (cuadrados) y > 10 cm (triángulos). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

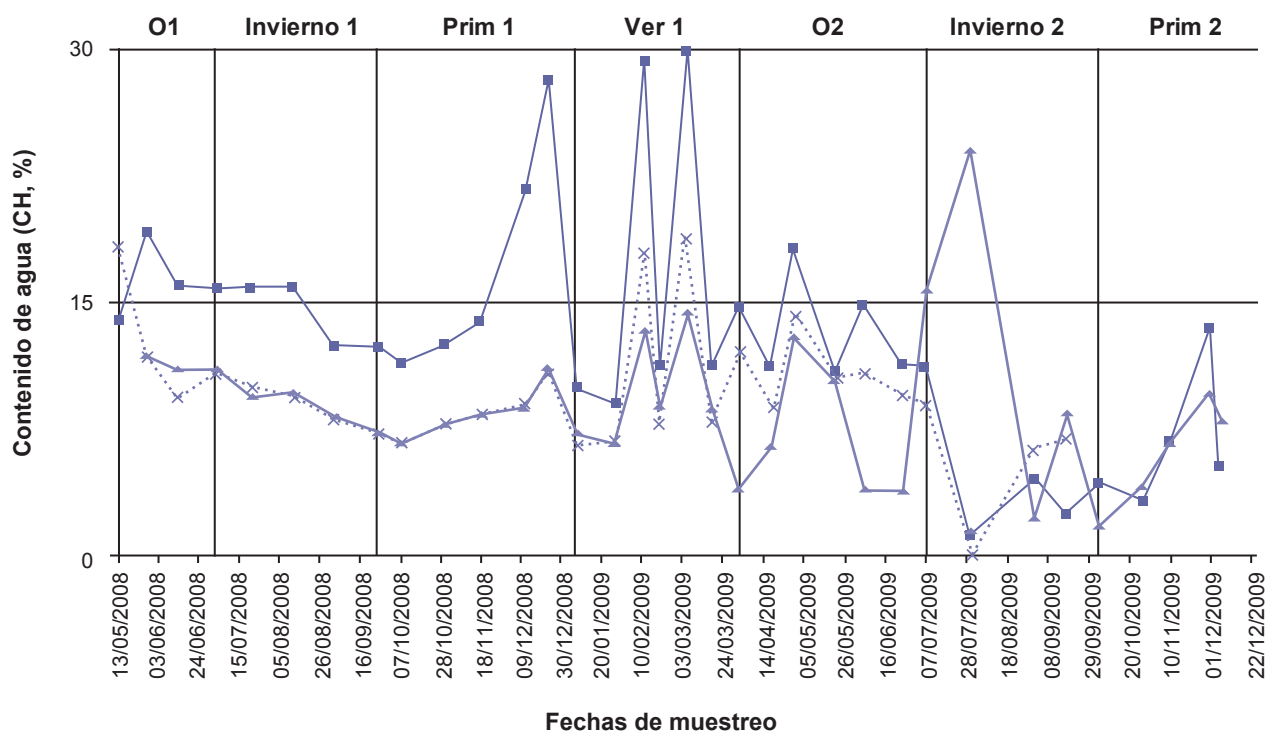


Figura 8. Dinámica estacional del CH (%) en residuos leñosos de *Acacia furcatispina* clasificados por categorías de diámetro: 0,5-2,5 cm (cruces); 2,5-10 cm (cuadrados); > 10 cm (triángulos). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

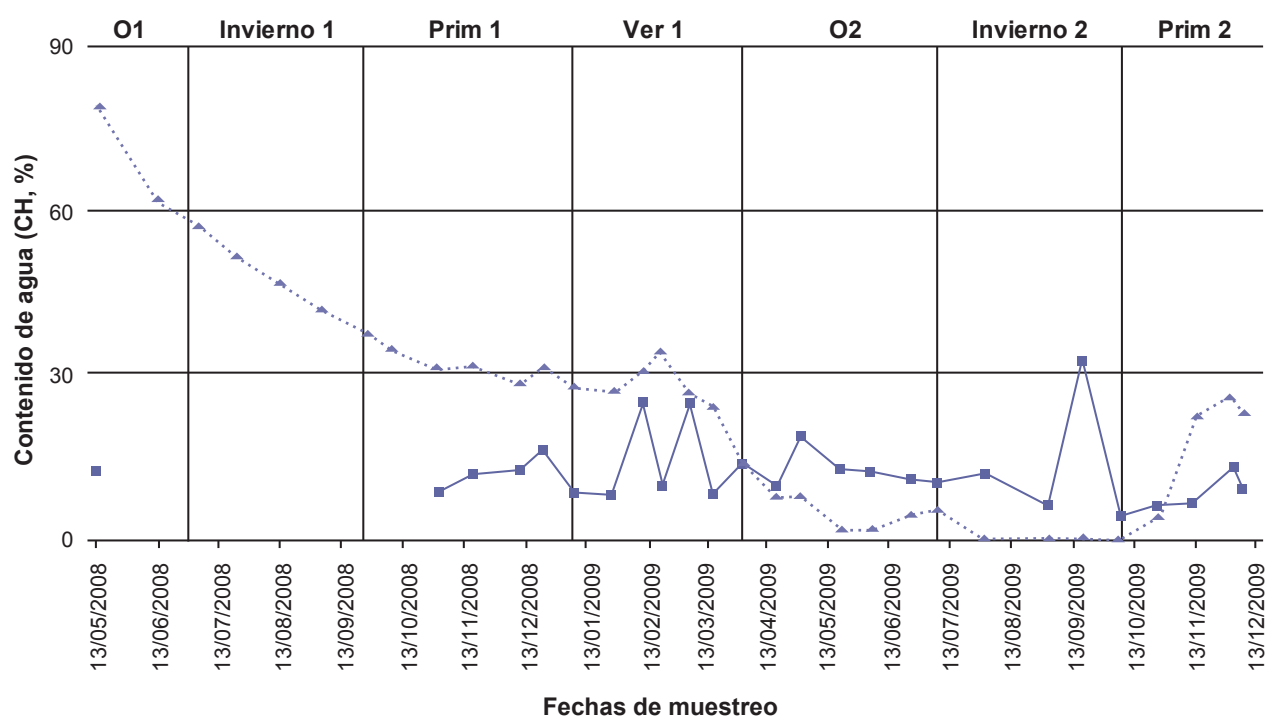


Figura 9. Dinámica estacional del CH (%) en residuos leñosos de *Zizyphus mistol*, clasificados en categorías de diámetro: 2,5-10 cm (cuadrados) y > 10 cm (triángulos). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

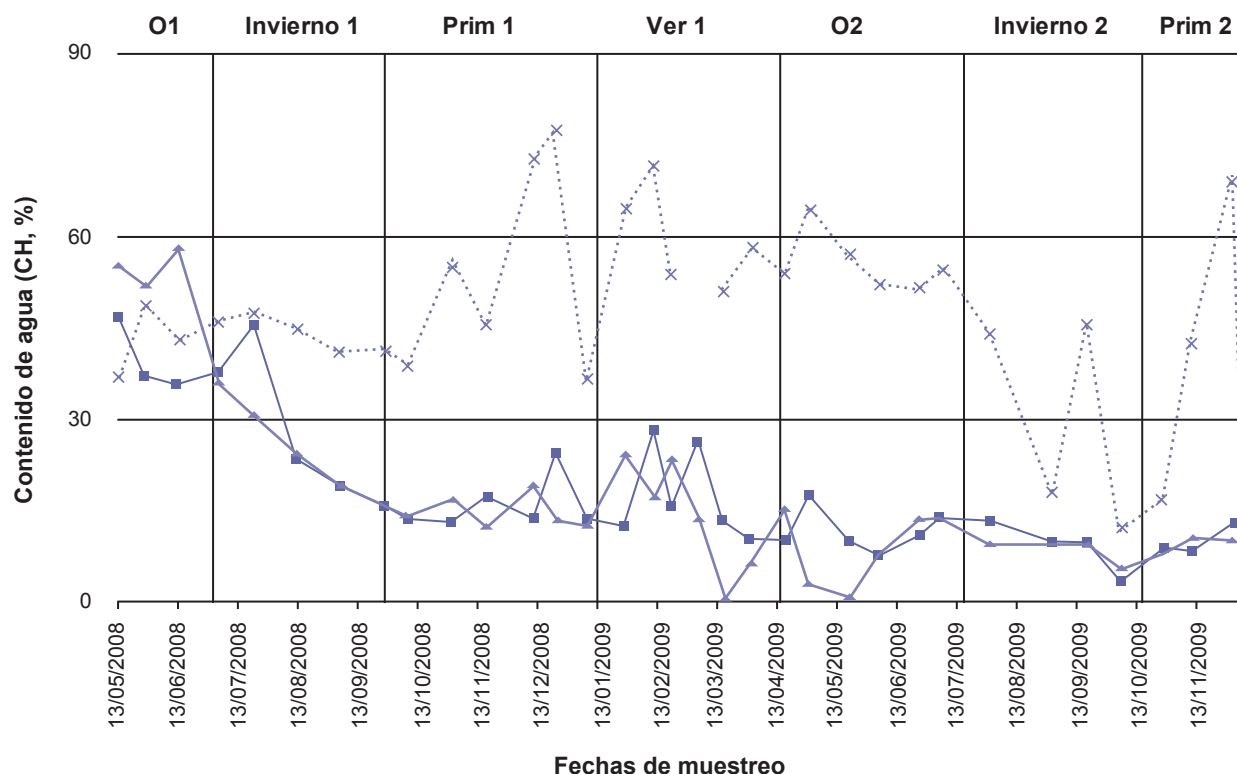


Figura 10. Dinámica estacional del CH (%) en residuos leñosos de *Aspidosperma quebracho-blanco* clasificados en categorías de diámetro: 0,5-2,5 cm (cruces); 2,5-10 cm (cuadrados) y > 10 cm (triángulos). Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera.

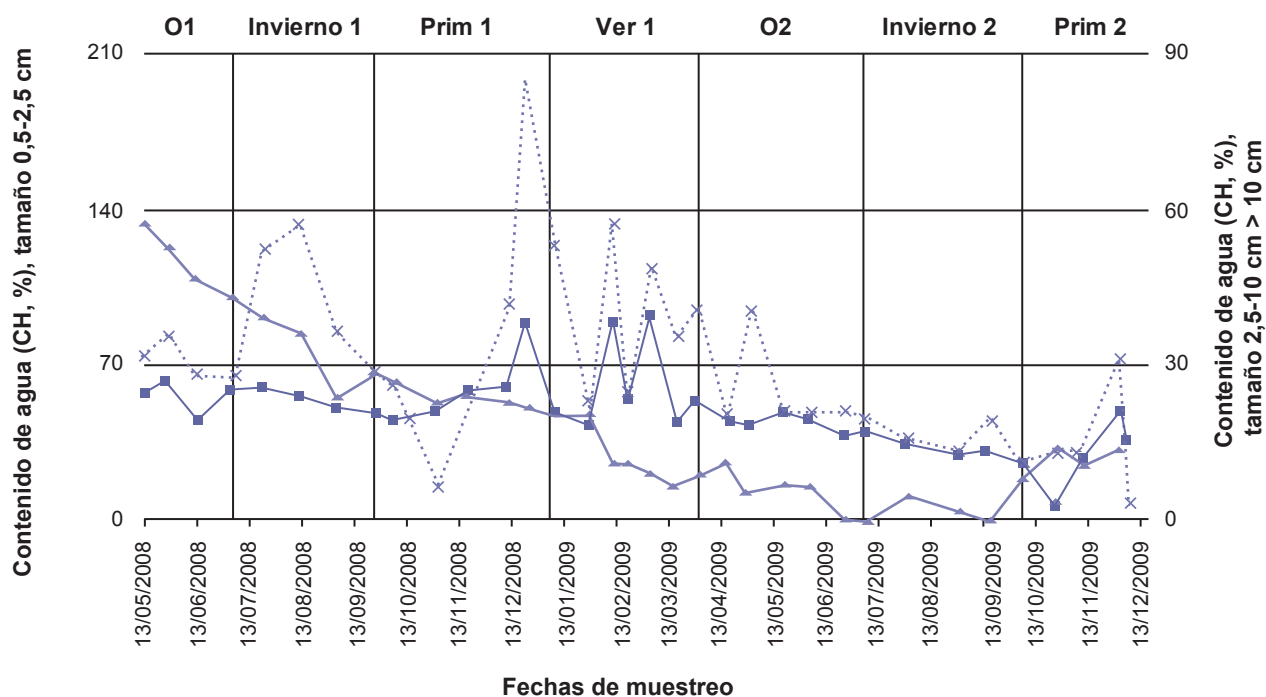


Figura 11. Dinámica estacional del CH (%) en residuos leñosos de *Schinopsis lorentzii* clasificados en categorías de diámetro: 0,5-2,5 cm (cruces); 2,5-10 cm (cuadrados); > 10 cm (triángulos), Campo Experimental 'La María', INTA EEA Santiago del Estero, 2008-09.

Referencias: O: otoño; Ver: verano; Prim: primavera

de la sinusoide del CH promedio a través del tiempo especialmente en los árboles; y su correlación no significativa con la HS y la precipitación en la mayoría de las especies se atribuye a que las especies leñosas del Chaco poseen raíces profundas, tejidos de protección contra la evaporación (cutículas gruesas) y por lo tanto, una mejor economía del agua que otras especies. A las diferencias intrínsecas se atribuyen también la significativa interacción estación climática*especie.

Las diferencias en la amplitud de la sinusoide del CH entre arbustos y árboles ha sido informada para otros ecosistemas (Viegas *et al.*, 2001; Alessio *et al.*, 2008; Pellizzaro *et al.*, 2006) y son consecuencia probablemente de la distinta fisiología y profundidad de exploración de las raíces.

Los hechos planteados en los párrafos anteriores sugieren una proclividad significativa al fuego de las especies leñosas nativas de la región chaqueña. Se desconoce el umbral mínimo del CH requerido para que el follaje de las especies leñosas nativas chaqueñas se encienda y se produzca 'coronamiento'. En coníferas en el hemisferio norte, el coronamiento se presenta con un CH = 75-130% (Van Wagner, 1977; Alexander, 1988; Scott y Reinhardt, 2001). Chuvieco *et al.* (2004) emplean 105% como CH de extinción promedio para arbustos de la zona mediterránea. Estas magnitudes de CH no fueron alcanzadas por las hojas y ramones de las especies observadas.

Las observaciones empíricas indican que generalmente el fuego se propaga por las sabanas chaqueñas, encendiéndose las comunidades leñosas en circunstancias particulares,

generalmente a principios-mediados de primavera (Bravo *et al.*, 2001). Tortorelli (1947) señala a *Schinus* spp. (molle) como una de las especies que actúa como 'puente' entre las sabanas y los bosques. Esta especie posee follaje perenne y presentó una magnitud del CH promedio alta en comparación con otras. En su inflamabilidad podría influir el contenido de sustancias volátiles típico del género (González *et al.*, 2011). La presencia de compuestos químicos puede interpretarse de varias maneras. Desde el punto de vista evolutivo, estos productos se asocian a la defensa contra herbívoros y plagas. Mutch (1970) sugiere que la alta inflamabilidad les confiere a las especies una ventaja adaptativa (hipótesis de 'matar al vecino', Pausas *et al.*, 2012).

En la hojarasca y residuos leñosos (combustibles muertos) la variación del CH responde a procesos físicos tales como la absorción de agua resultado del mojado por lluvia y por cambios en la humedad relativa del aire (Nelson, 2001). En la hojarasca, y en residuos de tamaño 0,5-2,5 cm de algunas especies, se observó correlación significativa entre el CH, la HS y la precipitación. La hojarasca o mantillo de origen leñoso es el combustible en donde el fuego se enciende y propaga en bosques tropicales y subtropicales (Ray *et al.*, 2005; Kunst, observación personal), aunque la carga por unidad de superficie sea escasa. El bajo CH promedio de la hojarasca para el período 2008-2009, generalmente inferior al umbral para el encendido de CH $\leq 23\%$ sugerido por Ray *et al.* (2005) para ese tipo de combustible en los bosques amazónicos, y las contadas ocasiones en que superó el umbral de extinción, sugieren que en condiciones climáticas extremas la hojarasca pue-

de propagar el fuego a otros combustibles como los pastos y arbustos en el Chaco, tal como ha sido informado para otros ecosistemas (Ray *et al.*, 2005). El consumo de la hojarasca por parte del ganado en épocas críticas (Morello y Saravia Toledo, 1959) también puede modificar el régimen de fuego, al eliminar este tipo de combustible en una época propensa al fuego.

La forma casi rectilínea de la dinámica de CH en diámetros más gruesos sugiere pérdida permanente de agua (desorción) más que un equilibrio entre absorción y desorción en estos combustibles. La falta de asociación entre la dinámica del CH de los residuos de mayor tamaño y las variables ambientales evaluadas puede atribuirse a que las maderas chaqueñas son prácticamente impermeables, debido a su alto peso específico, su composición química, y a la cobertura arbórea (sombra), que reguló el ambiente dentro del modelo 'media loma'.

La información sobre umbrales del CH de encendido y extinción en residuos leñosos de especies chaqueñas es inexistente. Para residuos de *Prosopis velutina* (mesquite), Mc Pherson y Wright (1986) informaron un CH \approx 5-6% como umbral de encendido y un umbral de extinción de CH \approx 9-10%. Residuos de coníferas (*Abies sp.*, *Pinus sp.*) se consumen en alto porcentaje con CH \approx 10-15%, pero muy poco con CH \approx 25-30% (Knapp *et al.*, 2005). Estos umbrales se alcanzaron en el segundo invierno luego de cortadas las muestras de residuos. Los resultados sugieren que los fuegos prescritos destinados a reducir la carga de combustibles (residuos) medianos y pesados del rolado debería realizarse durante el primer invierno luego del rolado, a fin de evitar excesiva liberación de energía.

Este trabajo empleó una sola localidad de muestreo, limitando la extrapolación espacial de la prevención del fuego en base a CH, pero permitiendo avanzar en detalle sobre su dinámica temporal. En ese aspecto, el patrón sinusoidal del CH observado en muchos combustibles sugiere que para su predicción es posible utilizar ecuaciones diferenciales debido a su regularidad en el tiempo (Catchpole *et al.*, 2001).

La significancia estadística de la correlación entre el CH y las variables ambientales es un índice de la fiabilidad de las predicciones del peligro de fuego cuando se usan métodos indirectos (Ruiz Gonzalez, 2004). En general, la fortaleza de las asociaciones fue media, sugiriendo que las mismas deben estudiarse con mayor detalle. Las especies más útiles como indicadores de la variabilidad temporal por la gran magnitud entre su CH y la HS, la precipitación y especialmente con la humedad relativa del aire máxima y mínima, serían: (a) *Schinus* spp. (molle), por poseer follaje perenne y presencia en gran parte del territorio chaqueño, hecho que la haría muy útil para captar la variabilidad espacial; y (b) *Lippia turbinata* (poleo) por la gran magnitud del coeficiente de correlación.

CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS PARA EL MANEJO

El CH es un indicador de la inflamabilidad de los combustibles y, por lo tanto, su dinámica puede emplearse para

identificar épocas de aplicación de fuego prescripto y/o de riesgo de fuego accidental. La pauta general de la dinámica temporal del CH respondió a la observación empírica del ciclo invierno-verano, pero se observaron distorsiones de ese patrón general, que se deberían a factores propios de las especies, como profundidad de raíces, estacionalidad del follaje, etc., que deben tenerse en cuenta al seleccionar alguna especie como indicadora.

La magnitud, dispersión y dinámica del CH indican que en el caso del follaje de árboles y arbustos, el invierno y la primavera son las estaciones más proclives al fuego. La época menos propensa al fuego sería fines del verano y el otoño. Este resultado debe interpretarse en términos generales, ya que se presentan variaciones importantes debido a las condiciones climáticas del año, a la especie y al tipo de combustible considerado. Para los residuos leñosos, la época menos proclive al fuego es la temporada siguiente a su corte, mientras el riesgo de fuego aumenta con el tiempo, especialmente en la primavera y verano siguientes. La hojarasca fue muy dependiente de las condiciones ambientales, por ello si no hay precipitación, sería un componente importante en el incremento de la probabilidad de ignición y propagación del fuego, tal como sucede en otros ecosistemas del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Proyecto FP6-018505 FIRE PARADOX 'An innovative approach of integrated wildland fire management regulating the wildfire problem by the wise use of fire: solving the fire paradox', European Union, 6th Framework, y por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Área Estratégica Forrajes y Pasturas, Proyecto Específico 1503 'Incremento de la productividad de pastizales naturales' 2006-2009.

BIBLIOGRAFÍA

- AGEE, J.; WRIGHT, C.; WILLIAMSON, N.; HUFF, M. 2002. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management* 67: 57-66.
- ALESSIO, G.; PEÑUELAS, J.; LLUSIA, J.; OGAYA, R.; ESTIARTE, M.; DE LILLIS, M. 2008. Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. *International Journal of Wildland Fire* 17: 274-286.
- ALEXANDER, M. 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany* 60: 255-265.
- ALEXANDER, M. 1988. Help with making crown fire hazard assessments. Symposium and Workshop on Protecting People and Homes from Wildfire in the Interior West, Missoula, MT, p. 147-156.
- ANDREWS, P.; ANDERSON, S.; ANDERSON, W. 2006. Evaluation of a dynamic load transfer function using grassland curing data. U. S. D. A. Forest Service Proceedings RMRS-P-41. p. 381 - 394.
- BIANCHI, L.; DEFOSSÉ, G.; DENTONI M.; KUNST, C.; LEDESMA, R.; BRAVO, S. 2013. Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y manejo de fuego en la región chaqueña occidental (Argentina) I: conceptos básicos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)* 40 (2): 154-164.

- BOLETTA, P. 1988. Clima. Cap. 1, p. 7-21. En: CASAS, R.(compilador): Desmonte y habilitación de tierras en la región chaqueña semiárida. F.A.O., Santiago, Chile.306 p.
- BRAVO, S.; KUNST, C.; GIMÉNEZ, A.; MOGLIA, G. 2001. Fire regime of a *Elionorus muticus* Spreng. savanna, western Chaco region, Argentina. *International Journal of Wildland Fire* 10: 1-8.
- BUCHER, E. 1982. Chaco and Caatinga. South American arid savannas, woodlands and thickets. p. 48-79. In: B. Huntley and B. Walker (eds): *Ecology of tropical savannas*. Ecol. Studies Vol. 42. Springer Verlag, Berlín.
- CASTRO, F.; TUDELA, A.; SEBASTIÁ, M. 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology* 116: 49-59.
- CATCHPOLE, E.; CATCHPOLE, W.; VINEY, N.; McCAW, W.; MARSDEN-SMEDLEY, J. 2001. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire* 10: 215-222.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; DIMITRAKOPOULUS, P. 2004. Conversion of fuel moisture values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2284-2293.
- CHUVIECO, E., GONZALEZ, I., VERDÚ, F., AGUADO, I. 2009. Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem. *International Journal of Wildland Fire* 18: 430-441.
- CONOVER, W. 1980. *Practical nonparametric statistics*. J. Wiley and Sons, N. Y. 494 p.
- FERNANDES, P.; LOUREIRO, C.; BOTELHO, H. 2012. Piropinus: A spreadsheet application to guide prescribed burning operations in maritime pine forest. *Computers and Electronics in Agriculture* 81: 58-61.
- GONZÁLEZ, S.; GUERRA, P.; BAREN, C.; LIRA, P.; BANDONI, A. 2011. El aceite esencial de tallos y hojas de *Schinus patagonicus* (Phil.) Johnst.en el ecotono de la Patagonia, Argentina. *Domínguezia* 27: 33-39.
- HAMMER, Ø. 2013. *PAST: Paleontological Statistics. Reference Manual version 3*. Universidad de Oslo. <http://folk.uio.no/ohammer/past> (verificado: 03 de diciembre de 2013)
- KEYES, C. 2006. Foliar moisture contents of North American conifers. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41*.
- KNAPP, E.; KEELEY, J.; BALLENGER, E.; BRENNAN, T. 2005. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management* 208: 383-397.
- KUNST, C.; BRAVO, S.; MOSCOVICH, F.; HERRERA, J.; GODOY, J.; VÉLEZ S. 2001. Control de tusca (*Acacia aroma* Gill ap. H. et A.) mediante fuego prescripto. *Rev. Arg. Prod. Animal*. 20: 199-213.
- KUNST, C.; LEDESMA R.; CASILLO J.; GODOY J. 2006a. Rolados y residuos leñosos: II Dinámica del contenido de humedad de combustibles de origen leñoso. CIEFAP, *Actas Ecofuego* 217-219.
- KUNST C., MONTI E., PÉREZ H., GODOY J. 2006b. Assessment of the rangelands of southwestern Santiago del Estero, Argentina, for grazing management and research. *Journal of Environmental Management* 80: 248-265.
- MATT DAVIES, G.; LEGG, C. 2011. Fuel moisture thresholds in the flammability of *Calluna vulgaris*. *Fire Technology* 47: 421-436.
- MCPHERSON, G.; WRIGHT, H. 1986. Threshold requirements for burning downed honey mesquite. *Journal of Range Management* 39: 327-330.
- MORELLO, J.; SARAVIA TOLEDO, C. 1959. El bosque chaqueño I y II. *Rev. Agronómica del Noroeste Argentino*, 3: 5-81/209-258.
- MUTCH, R. 1970. Wildland fires and ecosystems-a hypothesis. *Ecology* 51: 1046-1051.
- NELSON, R. 2001. Water relations of forest fuels. Cap. 4, 79-149. En: JOHNSON, E.; MIYANISHI, K.: *Forest fires: behavior and ecological effects*. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- PAUSAS, J.; MOREIRA, B. 2012. Flammability as a biological concept. *New Phytologist* 194: 610-613.
- PELLIZZARO, G.; CESARACCIO, C.; DUCE, P.; VENTURA, A.; ZARA, P. 2006. Influence of seasonal weather variations and vegetative cycle on live moisture content and ignitability in Mediterranean maquis species. http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30581342/pellizzaro_et_al_italy.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1385645367&Signature=9xbCSY1WU%2B5aFOnAxproUs9lff4%3D&response-content-disposition=inline. (Verificado: 03 de diciembre de 2013)
- RAMSEY, F.; SCHAFFER, D. 2002. *The statistical sleuth. Duxbury –Thomson Learning, CA, USA, 742 p.*
- RAY, D.; NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. 2005. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecological Applications* 15: 1664-1678.
- ROTHERMEL, R. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-143.
- ROTHERMEL, R.; WILSON, R.; MORRIS, G.; SACKETT, S. 1986. Modeling moisture content of fire dead wildland fuels: input to the BEHAVE fire prediction system. US Dept. of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-359 Intermountain Research Station Ogden, UT.
- RUIZ GONZALEZ, A. 2004. La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. Tesis Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Ingenieros de Montes. 440 p. <http://oa.upm.es/302/> (Verificado: 04 de diciembre de 2013)
- SAS. 1998. Release 6.12 Edition. SAS Institute Inc. Cary, N. C.
- SCHROEDER, M.; BUCK, C. 1970. Fire weather. US Dept. of Agriculture, *Agriculture Handbook N.º 70*. 230 pp.
- SCOTT, J.; REINHARDT, E. 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. *USDA Forest Service Research Paper RMRS-RP-29*.
- SULLIVAN, A. 2010. Grassland fire management in future climate. Cap. 5, p. 173-208. *Advances in Agronomy* 106. Elsevier.
- SUN, L.; ZHOU, X.; MAHALINGHAM, S.; WEISE, D. 2006. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels. *Combustion and Flame* 144: 349-359.
- TORTORELLI, L. 1947. Los incendios de bosques en la Argentina. Ministerio de Agricultura, Dirección Forestal, Buenos Aires, 238 p.
- VAN WAGNER, C. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forestry Research* 7: 23-34
- VIEGAS, D.; PIÑOL, J.; VIEGAS, M.; OGAYA, R. 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indexes. *International Journal of Wildland Fire* 10: 223-240.
- WITTICH, K. 2011. Phenological observations of grass curing in Germany. *International Journal of Biometeorology* 55: 313-318.
- ZAR, J. 1999. *Biostatistical analysis*. 4th Edition, Prentice Hall, N. J.